

ANALISIS SIKLUS TERMODINAMIKA KONVERSI PANAS BERSUHU RENDAH KE TENAGA MEKANIK BERDASARKAN SIKLUS RANKINE ORGANIK

DWI SETIAWAN



**ILMU KETEKNIKAN PERTANIAN
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2020**

PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi berjudul Analisis Siklus Termodinamika Konversi Panas Bersuhu Rendah ke Tenaga Mekanik Berdasarkan Siklus Rankine Organik adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Desember 2020

Dwi Setiawan
NIM F163160138

RINGKASAN

DWI SETIAWAN. Analisis Siklus Termodinamika Konversi Panas Bersuhu Rendah ke Tenaga Mekanik Berdasarkan Siklus Rankine Organik. Dibimbing oleh ARMANSYAH H. TAMBUNAN, Y. ARIS PURWANTO, dan I DEWA MADE SUBRATA

Pemanfaatan panas buang yang mempunyai suhu rendah untuk dikonversi menjadi energi listrik merupakan salah satu solusi ditengah isu krisis energi fosil. Salah satu siklus termodinamika konversi panas bersuhu rendah untuk menghasilkan kerja ialah Siklus Rankine Organik (SRO). Semakin rendah suhu sumber panas maka efisiensi konversinya ke kerja yang bisa dimanfaatkan juga semakin kecil. Dalam rangka mengoptimalkan kinerja SRO maka perlu diketahui dan dievaluasi tingkat *irreversibilitas* (ketak-mampu-balikan)-nya terutama pada komponen vital SRO yaitu ekspander. Oleh karena itu tujuan dari penelitian ini ialah: 1) mengembangkan model matematika untuk mensimulasi dan memilih fluida kerja yang paling tepat berdasarkan analisis eksergi; 2) mengevaluasi kinerja ekspander yang diperoleh dari pembalikan compressor untuk digunakan pada system SRO berdasarkan prinsip pembangkitan entropi. Penelitian ini dimulai dengan menurunkan model matematika berdasarkan prinsip pembangkitan entropi dalam rangka menentukan fluida kerja SRO. Selanjutnya dilakukan pabrikasi, serta uji kinerjanya berdasarkan fluida kerja terpilih. Pada tahap akhir dilakukan analisis pembangkitan entropi pada hasil uji kinerja SRO.

Analisis pembangkitan entropi telah dilakukan untuk menjaring 30 fluida kerja organik pada suhu keluar evaporator 60 °C. Berdasarkan analisis tersebut didapatkan bahwa fluida kerja terbaik berdasarkan efisiensi eksergi ialah Benzene yaitu sebesar 6.41%. Toluene menjadi fluida kerja organik yang mempunyai efisiensi energi tertinggi yaitu 7.75%. Beberapa fluida kerja organik mengalami kenaikan efisiensi eksergi sejalan dengan kenaikan suhu inlet ekspander. Dari sisi kerja keluarannya mengalami kenaikan secara linier sejalan dengan kenaikan suhu inlet ekspander. Parameter yang sensitif terhadap perubahan efisiensi eksergi ialah panas laten dengan tingkat korelasi sebesar $R^2=0.96$, dibandingkan parameter panas spesifik ($R^2=0.69$), volume spesifik (0.61), suhu kritis ($R^2=0.20$), dan tekanan kritis ($R^2=0.1$). Kendati Benzene mempunyai efisiensi eksergi tertinggi, namun juga mempunyai sifat yang mudah terbakar dan mempunyai tekanan operasi pada evaporator dan kondensor sangat rendah. Oleh karena itu pada tahap penentuan komponen dan pengujiannya digunakan fluida kerja R134a berdasarkan pertimbangan keamanan dan ketersediaan di pasar.

SRO dipabrikasi dengan menggunakan ekspander hasil pembalikan kompressor, dan karakteristik ekspander dari pembalikan kompresor tersebut dianalisis. Karakteristik awal kompressor menunjukkan nilai rata-rata rasio suhu 1.84 dan rasio tekanan 1.44. Berdasarkan uji performansi SRO, ekspander hasil pembalikan kompressor mempunyai rata-rata rasio tekanan dan rasio suhu berturut-turut ialah sebesar 1.33 dan 1.26. Mesin SRO yang dipabrikasi mampu menghasilkan daya mekanik hasil pengukuran tertinggi sebesar 28.09 W, yang dicapai saat suhu keluar evaporator sebesar 56.6 °C. Selanjutnya diketahui bahwa semakin tinggi suhu evaporator cenderung menghasilkan daya mekaniknya yang juga semakin tinggi. Efisiensi energi ekspander terbesar pada penelitian ini ialah

sebesar 12.34%, sedangkan efisiensi isentropik siklus ekspansi rata-rata yang diperoleh adalah sebesar 77.66%. Berdasarkan analisis kemampu-balikan didapatkan bahwa ekspander yang merupakan hasil pembalikan kompresor masih cukup efektif digunakan pada mesin ORC, sebagaimana ditunjukkan oleh hubungan antara rasio tekanan dengan efisiensi isentropis dan laju pembangkitan entropinya.

Kata kunci: Ekspander dari pembalikan kompresor, analisis eksergi, Siklus Rankine Organik (SRO), fluida kerja.

@Hak Cipta milik IPB University

SUMMARY

DWI SETIAWAN. Analysis of Low Temperature Heat Thermodynamic Cycle to Mechanical Work Based on Organic Rankine Cycle. Supervised by ARMANSYAH H. TAMBUNAN, Y. ARIS PURWANTO, dan I DEWA MADE SUBRATA

Converting low temperature waste heat to electric power is one of the solutions in the midst of the fossil energy crisis issue. One of the thermodynamic cycles of low temperature heat conversion to produce work is the Organic Rankine Cycle (ORC). However, the lower the temperature of the heat source, the smaller its conversion efficiency to usable work. In order to optimize ORC performance, it is necessary to investigate and evaluate the level of irreversibility (irreversibility) of the process. Therefore, the objectives of this study are: 1) to build a mathematical model in order to simulate and select the appropriate ORC working fluid based on exergy analysis; 2) to evaluate the performance of a compressor-reversed expander to be used in ORC based on entropy generation principles. This research begins with the construction of a mathematical model based on the principle of entropy generation in order to determine suitability of the ORC working fluid. Furthermore, fabrication ORC system was carried out, and its performance was tested based on the selected working fluid. Finally, analysis of entropy generation was carried out on the ORC performance test results.

Entropy generation analysis was carried out to select 30 organic working fluids at evaporator outlet temperature of 60 °C. It was found that the best working fluid based on exergy efficiency was Benzene, which was 6.41%. Toluene was the organic working fluid which has the highest energy efficiency of 7.75%. Some organic working fluids experience an increase in exergy efficiency in line with the increase in the expander inlet temperature. As for the work, the output has increased linearly in line with the increase in the expander inlet temperature. Meanwhile, latent heat showed highest sensitivity to exergy efficiency change with a correlation level of $R^2 = 0.96$, compared to specific heat ($R^2 = 0.69$), specific volume ($R^2 = 0.61$), critical temperature ($R^2 = 0.20$), and critical pressure ($R^2 = 0.1$). Although Benzene had the highest exergy efficiency, it is flammable and had a very low operating pressure on the evaporator and condenser temperature. Therefore, considering its safety and market availability, R134a was used as working fluid for component determination and testing.

ORC installation was manufactured by using expander from a reversed compressor, and the characteristic of the compressor-reversed expander was evaluated. Originally, the compressor has an average temperature ratio of 1.84 and a pressure ratio of 1.44. Meanwhile, based on the ORC performance test, the expander has an average pressure ratio and temperature ratio of 1.33 and 1.26, respectively. The manufactured ORC was capable of producing mechanical power of 28.09 W, which was achieved at evaporator's outlet temperature of 56.6 °C. It was also found that higher evaporator temperature would result in higher mechanical power. The highest energy efficiency of the expander was 12.34%, and the average isentropic efficiency of the expansion cycle was 77.66%. Based on the reversibility analysis, the compressor-reversed expander performed well for the

ORC machine, as indicated by the relationship between the pressure ratio with the isentropic efficiency and the entropy generation rate.

Keywords: compressor-reversed expander, exergy analysis, Organic Rankine Cycle (ORC), working fluid.

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2020

Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

ANALISIS SIKLUS TERMODINAMIKA KONVERSI PANAS BERSUHU RENDAH KE TENAGA MEKANIK BERDASARKAN SIKLUS RANKINE ORGANIK

DWI SETIAWAN

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktoral
pada
Program Studi Ilmu Keteknikan Pertanian

**ILMU KETEKNIKAN PERTANIAN
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2020**



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

1. Dr. Radite P. A. Setiawan, M.Agr
2. Dr. Eng. Aep Saepul Uyun, STP, M.Eng

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Terbuka Disertasi:

1. Dr. Radite P. A. Setiawan, M.Agr
2. Dr. Eng. Aep Saepul Uyun, STP, M.Eng

: Analisis Siklus Termodinamika Konversi Panas Bersuhu Rendah ke
Tenaga Mekanik Berdasarkan Siklus Rankine Organik
: Dwi Setiawan
: F163160138

Disetujui oleh

Pembimbing I:
Nama lengkap dan gelar

Prof. Dr. Ir. Armansyah H. Tambunan

Pembimbing II:
Nama lengkap dan gelar

Prof. Dr. Ir. Y. Aris Purwanto, M.Sc

Pembimbing III:
Nama lengkap dan gelar

Dr. Ir. I Dewa Made Subrata, M.Agr

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Nama lengkap dan gelar
NIP

Dr. Ir. Wawan Hermawan, MS
196303291987031018

Dekan Sekolah Pascasarjana:
Nama lengkap dan gelar
NIP

Prof. Dr. Ir. Anaz Miftah Fauzi, M.Eng
196004191985031002

Tanggal Ujian: 17 Desember 2020

Tanggal Lulus: 17 DEC 2020

@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

PRAKATA

Alhamdulillah *rabbil 'alamin*, atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang perencanaannya dimulai sejak bulan September 2015 di Lab. Pindah Panas dan Massa ini ialah tentang analisis termodinamika Siklus Pembangkit Tenaga. Secara spesifik berjudul Analisis Siklus Termodinamika Konversi Panas Bersuhu Rendah ke Tenaga Mekanik Berdasarkan Siklus Rankine Organik. Penyusunan disertasi ini dimaksudkan sebagai salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk mencapai gelar Doktor pada Program Studi Ilmu Keteknikan Pertanian, Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor.

Disertasi ini dapat diselesaikan dengan bantuan berbagai pihak, oleh karena itu penulis ingin menyampaikan beberapa hal kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Armansyah H. Tambunan, selaku pembimbing utama yang telah memilih penulis sebagai mahasiswa bimbingan dan penerima beasiswa PMDSU. Selain pembimbingan dalam penelitian doktoral ini, penulis juga banyak mendapatkan contoh bagaimana seyogyanya menjadi pengajar yang berintegritas dan banyak hal positif lain yang jika diuraikan akan lebih tebal dari pada disertasi ini.
2. Prof. Dr. Ir. Y. Aris Purwanto M.Sc, selaku pembimbing ke dua. Penulis mengucapkan terima kasih atas bimbingannya, dan telah mengajari penulis bagaimana menyederhanakan suatu masalah, dan berpikir lebih realistis.
3. Dr. Ir. I Dewa Made Subrata M.Agr, selaku pembimbing ke tiga. Penulis mengucapkan terima kasih atas saran dan masukannya, atas kesabarannya yang selalu membuat penulis merasa iri.
4. Dr. Ir. Radite P. A. Setiawan, M.Agr, selaku penguji luar komisi pertama disertasi ini. Penulis mengucapkan terima kasih atas saran dan masukannya, atas contoh bagaimana menjadi figur yang mempunyai pikiran akademik liar yang mana sangat diperlukan sebagai peneliti, atas pemberian perspektif tertentu yang luput dari penulis.
5. Dr. Eng. Aep Saeupul Uyun, STP, M.Eng, selaku penguji luar komisi ke dua disertasi ini. Terima kasih atas kesediaannya menjadi penguji sekaligus memberikan solusi, atas saran yang tajam, atas contoh kehausan akan keingintahuan, serta rasa empati yang tinggi.
6. Dr. Ir. Wawan Hermawan, MS, selaku ketua program studi S3 Ilmu Keteknikan Pertanian (TEP). Penulis menyampaikan terima kasih atas saran agar kebaruan disertasi ini lebih tajam, dan atas kepeduliannya selama penulis menjadi mahasiswa S3 TEP.
7. Rifan Adi Kusuma, Agus Haryanto, dan Bintang S. Panjaitan yang telah membantu penulis dalam proses penelitian, diskusi tentang kontrol panel, dan penyesuaian gambar teknik.
8. Ibu, Bapak, dan adik yang telah demikian sabar dan berlapang dada karena harus berjibaku tanpa keikut-sertaan penulis di kampung halaman. Keluarga Mas Yon dan Mbak Ni yang telah mendukung dan meminjamkan sepeda motor untuk dibawa ke Bogor.

9. Bu Rus dan Mas Mul yang sering penulis repotkan, terima kasih atas bantuannya.
10. Teman-teman Lab. Pindah Panas dan Massa dari masa lampau sampai masa paling baru: Bu Inge, Bu Tatun, Pak Ali, Amir, Endah, Irwan,, Dian, Tiara, Wicak, Danti, Pak Hendri, Pak Joni, Pak John, Bang Kindi, Bang Omil, Baits, Renaldi, Johana, Fajar, Mas Furqon, Mbak Amna, yang mana telah memberikan banyak bantuan dan perenungan ke pada penulis.
11. Teman-teman Teknik Mesin Pertanian dan Pangan angkatan 2015, Ilmu Keteknikan Pertanian angkatan 2016, serta PMDSU gelombang ke-2, yang mana telah banyak membantu dan mengisi kehidupan penulis selama di Bogor.

Akhir kata, penulis menyadari disertasi ini masih jauh dari sempurna, semua saran akan diterima dengan tangan terbuka. Semoga disertasi ini bermanfaat.

Bogor, Desember 2020

Dwi Setiawan



DAFTAR ISI

PRAKATA	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
DAFTAR SIMBOL	ix
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Kebaruan Penelitian	3
II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Siklus Rankine Organik	4
2.2 Pemilihan Fluida Kerja	5
2.3 Pemilihan Ekspander	9
2.4 Hukum Kedua Termodinamika	16
III METODE PENELITIAN	19
3.1 Kerangka Pikir Penelitian	19
3.2 Penentuan Fluida Kerja	19
3.3 Penentuan Komponen dan Uji Kinerja SRO	26
3.4 Analisis Kinerja Termodinamika Siklus Kompresi dan SRO	31
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1 Pemilihan Fluida Kerja	34
4.2 Penentuan Komponen dan Uji Kinerja SRO	43
4.3 Analisis Pembangkitan Entropi Kompresor-Ekspander	59
V SIMPULAN DAN SARAN	65
5.1 Simpulan	65
5.1 Saran	66
DAFTAR PUSTAKA	67
LAMPIRAN	71
RIWAYAT HIDUP	96

DAFTAR TABEL

1. Penggunaan fluida kerja	8
2. Penelitian penggunaan turbin untuk SRO	10
3. Perbandingan jenis ekspander SRO	15
4. Parameter Operasi	21
5. Kandidat Fluida Kerja	22
6. Hasil simulasi kinerja fluida kerja SRO	35
7. Spesifikasi pompa SRO	46
8. Uji fungsional kompresor sebagai ekspander	48
9. Spesifikasi Kondensor	49
10. Spesifikasi pompa kondensor	50
11. Data hasil uji kinerja SRO	57
12. Hasil perhitungan properti termonimais Tabel 11	57
13. Suhu dan tekanan hasil pengukuran	60

DAFTAR GAMBAR

1. Skema Dasar dan Diagram T-S SRO	4
2. Diagram T-S Fluida Kerja Jenis <i>Wet</i> , <i>Dry</i> , dan <i>Isentropic</i>	6
3. Ekspander tipe radial (a); Bagian rotor (b); Bagian nozel (c)	10
4. Turbin jenis aksial (a); Mekanisme kerja (b)	10
5. Ekspander tipe ulir	11
6. Potensi kebocoran pada ekspander tipe ulir	12
7. Ekspander tipe <i>scroll</i>	12
8. Penambahan seal pada ekspander modifikasi kompresor	13
9. Ekspander tipe vane	14
10. Kebocoran pada ekspander tipe piston	15
11. Ilustrasi Energi, Entropi, dan Eksergi	18
12. Kerangka Pikir Penelitian	19
13. Diagram Alir Penentuan Fluida Kerja	20
14. Skema SRO untuk Simulasi Pemilihan Fluida Kerja (a); Diagram T-S SRO Teoritis (b)	21
15. Sistem Kontrol Volume	22
16. Diagram Alur Massa pada Pompa	23
17. Diagram Energi pada Evaporator	24
18. Diagram Alur Massa pada Ekspander	24
19. Diagram Alur Energi pada Kondensor	25
20. Diagram Alir Rancang Bangun SRO Aktual	26
21. Diagram SRO dan Peletakan Alat Ukur	27
22. Penkondisi sinyal termokopel tipe T	28
23. <i>Pressure transmitter</i> (a); pengkondisi sinyal (b)	29
24. <i>Interface Lab View</i>	29
25. Data akuisisi tipe NI CDAQ 9188	29
26. Flowmeter digital (a); flow meter analog (b)	30



27. Tachometer yang digunakan dalam penelitian	30
28. Mekanisme pengukuran torsi	31
29. Hubungan daya bersih terhadap panas laten	36
30. Diagram T-S fluida kerja tipe (a) <i>wet</i> , (b) isentropik, (c) <i>dry</i>	38
31. Hubungan suhu inlet ekspander dengan efisiensi eksergi	39
32. Hubungan suhu inlet ekspander dengan kerja keluaran	39
33. Hubungan suhu inlet ekspander dengan eksergi musnah	40
34. Hubungan panas laten dengan efisiensi eksergi	41
35. Hubungan panas spesifik dengan efisiensi eksergi	41
36. Hubungan volum spesifik dengan efisiensi eksergi	42
37. Hubungan suhu kritis dengan efisiensi eksergi	42
38. Hubungan tekanan kritis dengan efisiensi eksergi	43
39. Hubungan tekanan dengan suhu keluar evaporator	44
40. Hubungan tekanan dengan suhu masuk kondensor	44
41. Hubungan suhu keluar evaporator dengan selisih tekanan evaporator-kondensor dan daya keluaran	45
42. Hubungan suhu masuk kondensor dengan selisih tekanan evaporator-kondensor dan daya keluaran	45
43. Pompa SRO	46
44. Ekspander Tipe Skrol	47
45. Skema Uji Fungsional Kompresor sebagai Ekspander	47
46. Hubungan tekanan jatuh dengan kecepatan putar ekspander dengan menggunakan udara tertekan	48
47. Evaporator Spiral Satu Fase	49
48. Kondensor tipe PHE	50
49. Pompa sekunder SRO	50
50. Sitem kelistrikan pada kontrol panel SRO	51
51. Konstruksi SRO hasil rancangan	52
52. Pabrikasi SRO hasil rancangan	52
53. Profil suhu fluida kerja keluar komponen SRO	53
54. Profil suhu fluida pendingin pada kondensor	54
55. Penangan awal data tekanan hasil pengukuran	54
56. Profil tekanan fluida kerja keluar komponen SRO	55
57. (a) Diagram T-S, (b) Diagram P-h SRO hasil rancangan	56
58. Hubungan suhu keluar evaporator terhadap daya mekanik ekspander	58
59. Hubungan suhu keluar evaporator terhadap efisiensi energi ekspander	58
60. Hubungan suhu keluar evaporator dengan rasio tekanan	59
61. Hubungan rasio tekanan dengan kerja teoritis	60
62. Hubungan rasio tekanan terhadap efisiensi isentropik	61
63. (a) Diagram Suhu-Entropi, (b) Diagram Tekanan-Entalphi pada proses ekspansi dan kompresi	62
64. Hubungan rasio tekanan terhadap epektifitas isentropik	62
65. Hubungan rasio tekanan terhadap pembangkitan entropi	63
66. Hubungan rasio tekanan terhadap beda suhu permukaan ekspander dengan lingkungan	63

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Coding untuk simulasi	71
Lampiran 2 Data pengukuran uji kinerja siklus kompresi	78
Lampiran 3 Hasil pengukuran daya dan debit siklus kompresi	84
Lampiran 4 Hasil pengukuran suhu dan tekanan siklus ekspansi	85
Lampiran 5 Hasil plotting kinerja SRO ke diagram P-h dan T-s	88
Lampiran 6 Gambar teknik SRO.....	93

DAFTAR SIMBOL

A	arus (amphere)
A_s	luas permukaan kompressor atau ekspander (m^2)
D	diameter kompressor atau ekspander (m)
Ex	eksergi (W)
Gr_L	angka Grashof
h	spesifik entalpi (J/kg)
i	ireversibilitas (<i>exergy destruction</i>) (W)
K_n	Kalman gain, nilainya sebesar $\frac{1}{n}$
L	panjang lengan gaya (m)
M	berat beban (kg)
m	berat lengan (kg)
N	kecepatan putrar (RPM)
$\dot{m}$	laju aliran massa (kg/s)
P	tekanan (bar)
P_r	angka Prandtl (-)
$\dot{Q}$	kerja dalam bentuk panas/ kalor (W)
R	jari-jari poros ekspander (m)
$\dot{S}$	entropi (W/K)
T	suhu (K)
V	kecepatan (m/s)
$Volt$	tegangan (volt)
$\dot{W}$	kerja (W)
W_m	daya mekanik (kW)
$\hat{x}_{n,n}$	data yang diestimasi pada kondisi ke n
$\hat{x}_{n,n-1}$	data hasil prediksi pada kondisi ke n-1
g	percepatan gravitasi (m/s^2)
k	konduktivitas termal udara (W/m.K)
m	berat lengan (kg)
s	spesifik entropi (J/kg.K)
ν	viskositas kinematis udara (m^2/s)
z	ketinggian (m)

data hasil pengukuran sensor tekanan (bar)

Simbol Yunani

efisiensi (%)
beda/ selisih dari kondisi akhir dengan awal
massa jenis (kg/m^3)
viskositas (N.s/m^2)
konstanta pi dengan nilai 3.14159
torsi (N.m)
pembangkitan entropi (W/K)
koefisien ekspansi panas
faktor daya listrik 3 phase (-)
kecepatan sudut (rpm)

Subscripts

rev	mampubalik/ <i>reversible</i>
act	aktual
0	kondisi lingkungan
gen	pembangkitan entropi
i	inlet
e	outlet
j	kondisi pada saat ke j
$1 - n$	kondisi pada saat ke 1-n
$gen, \Delta T$	pembangkitan akibat pindah panas
$gen, \Delta P$	pembangkitan akibat kehilangan tekanan
p	pompa
t	ekspander
ev	evaporator
k	kondensor
f	fluida
s	kondisi isentropik
hf	sumber panas
cf	fluida dingin
mo	motor
in	input
b	belt
c	kompressor
v	efektivitas
max	maksimum
min	minimum
th	termal